

Modellezési premisszák, forgatókönyvek leírása

Zöld H2 a villamosenergia-rendszerben

Gyurity Erik
Parragh Viktor

Budapest, 2023.09.30.

Modellezési alapelvek



Alapelvek

A modell célja a hidrogén mint megújuló energia tárolására szolgáló megoldás vizsgálata a villamosenergia-rendszerben.

A hidrogén energetikai hasznosításának célja adott időszakban folyamatos, egyenletes energiaellátás (zsinóráram) biztosítása, tehát a modellben a rendelkezésre álló H_2 felhasználása egyenletesen történik.

A modell az értéklánc egészére kiterjed, a hidrogén előállításához szükséges zöld villamos energia termelésétől a hidrogén villamosenergia-termelési célú felhasználásáig.

A hidrogén előállításának és energetikai hasznosításának helyszíne megegyezik, emiatt a modellezett működésben csak a H_2 tárolása szükséges, a szállítása nem.

A modell tartalmazza a villamosenergia-rendszerbeli alkalmazás szempontjából kedvező hidrogén technológiákat és lehetővé teszi vizsgálatukat.

Hidrogén előállítási technológiák alkalmazása a villamosenergia-rendszerben

	Alkáli elektrolizáló	PEM elektrolizáló	Anion cserélő membrános elektrolizáló	Szilárd-oxidos elektrolizáló
VE-rendszer alkalmazás	Időjárásfüggő megújuló energia termelés integrációja	Időjárásfüggő megújuló energia termelés integrációja	Potenciálisan időjárásfüggő megújuló energia termelés integrációja	Folyamatos H ₂ előállítási alkalmazások, de elsősorban hőtermelés
TRL	TRL 9 	TRL 8 	TRL 6 	TRL 6 
Működési hőmérséklet	60 – 80 °C	50 – 80 °C	50 – 60 °C	700 – 900 °C
Működési nyomás	1 – 30 bar	30 – 70 bar	1 – 30 bar	1 – 30 bar
Hidrogén termelés	<760 Nm ³ H ₂ / óra Tisztaság: >99.5	<40 Nm ³ H ₂ / óra Tisztaság: >99.9999	<1 Nm ³ H ₂ / óra Tisztaság: >99.99	<1 Nm ³ H ₂ / óra Tisztaság: >99.999
Rendszer válasz	másodperc	ezredmásodperc	n/a	ezredmásodperc
Hazai potenciál	Magas, rövid távon alkalmazható is alkalmazható és viszonylag ismert technológia	Magas, rövid távon alkalmazható is alkalmazható és viszonylag ismert technológia	Korlátozott, az alacsony TRL szint miatt	Korlátozott, az alacsony TRL szint miatt

Hidrogén tárolási technológiák alkalmazása a villamosenergia-rendszerben



Sűrített



Fém-hidridek



Sóbarlang



Kimerült földgáz mező

VE-rendszerbeli alkalmazás	Rövidebb távú tárolásra, egyenletes terhelés esetén és kiegyensúlyozásra is	Egyenletes terhelés esetén, kiegyenlítésre kevésbé	Egyenletes terhelés esetén és kiegyensúlyozásra is	Szezonális tárolásra, egyenletes terhelés esetén
Tárolási költség	0,19 – 0,27 USD / kg	6 – 10 USD / kg	0,19 – 0,27 USD / kg	1,23 USD / kg
TRL	TRL 9	TRL 4 – 8	TRL 9	TRL 5 – 8
Tárolási idő	Napok – Hetek	Hetek – Hónapok	Hónapok – Évek	Hónapok – Évek
Tárolási volumen	MWh – GWh	MWh – GWh	GWh	GWh – TWh
Energetikai hatékonyság	90-95%	70-85%	85-95%	70-90%
Hazai potenciál	Magas, rövid távon is alkalmazható és könnyen hozzáférhető technológia	Közép és hosszú távon alkalmazható, tapasztalat-szerzés szükséges	Nincs elérhető geológiai formáció	Közepes, a potenciális geológiai formációk felmérése folyamatban

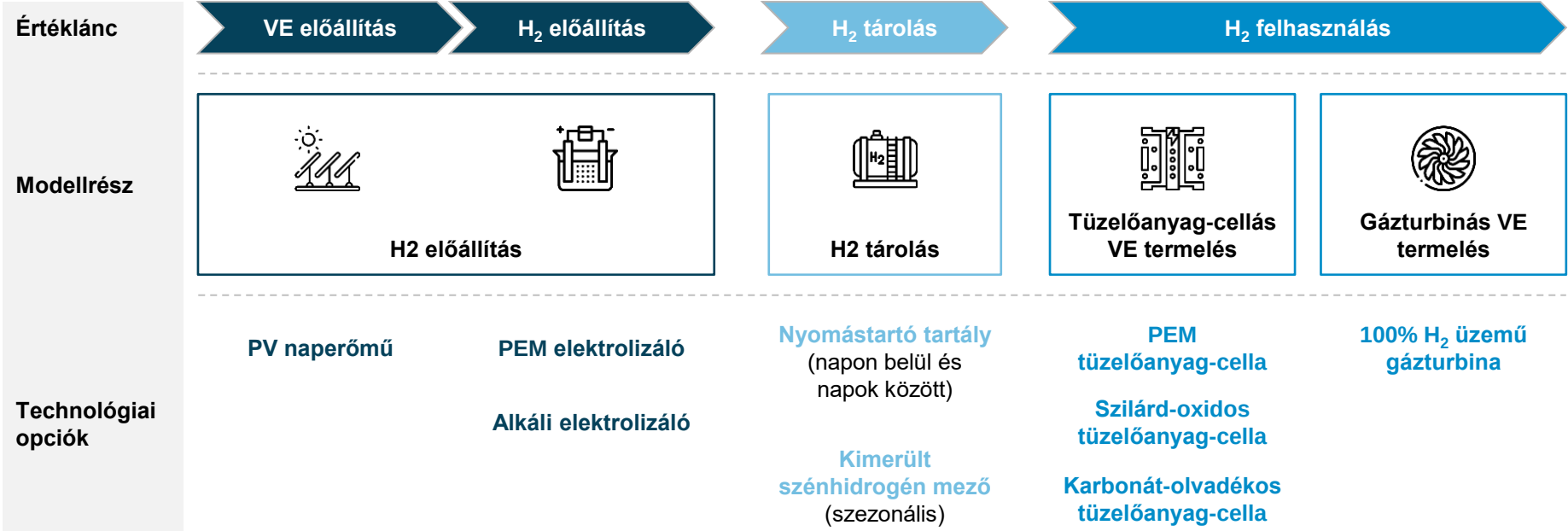
Hidrogén hasznosítási technológiák alkalmazása a villamosenergia-rendszerben

	PEM tüzelőanyag-cella	Szolid-oxidos tüzelőanyag-cella	Olvadék-karbonátos tüzelőanyag-cella	100% hidrogén üzemű gázturbina
VE-rendszer alkalmazás	Szabályozásban és kiegyensúlyozásban használható	Ideális telepített erőművi alkalmazásra és szigetüzemű energiatermelésre	Ideális telepített erőművi alkalmazásra (zsinórtermelés)	Ideális telepített erőművi alkalmazásra (zsinórtermelés)
TRL	TRL 9 	TRL 8 	TRL 8 	TRL 8 
Tipikus teljesítmény	0,5 – 400 kW	kW – MW	kW – MW	20 – 500 MW
Indítási idő	1 – 5 perc	1 – 4 óra	0,5 – 2 óra	Változó
Hidrogénigény	0,025 – 0,05 kg H ₂ / kWh	0,05 – 0,06 kg H ₂ / kWh	0,05 – 0,06 kg H ₂ / kWh	0,06-0,07 kg H ₂ / kWh
Energetikai hatékonyság	43 – 68 %	55 – 65 % (kapcsolt termelés: 90 %)	55 – 65 % (kapcsolt termelés: 85 %)	45 %
Hazai potenciál	Magas, rövid távon alkalmazható is alkalmazható és viszonylag ismert technológia	Közép és hosszú távon alkalmazható, további tapasztalatszerzés szükséges	Közép és hosszú távon alkalmazható, további tapasztalatszerzés szükséges	Közép és hosszú távon alkalmazható, további tapasztalatszerzés szükséges

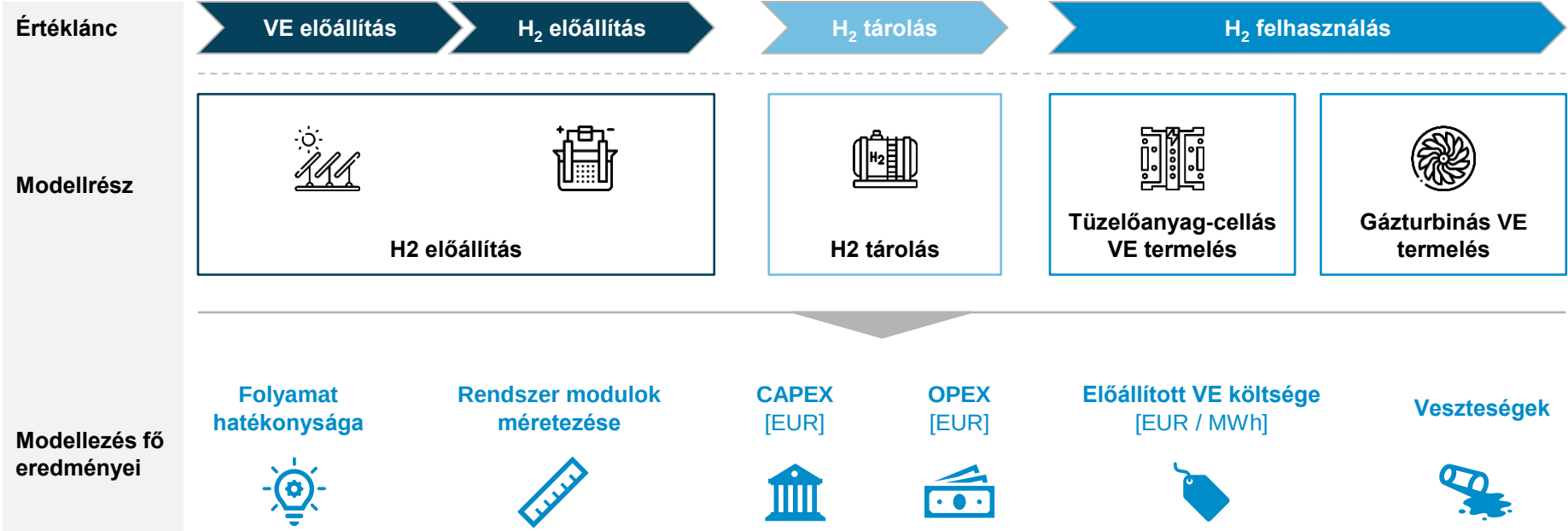
Modell felépítése



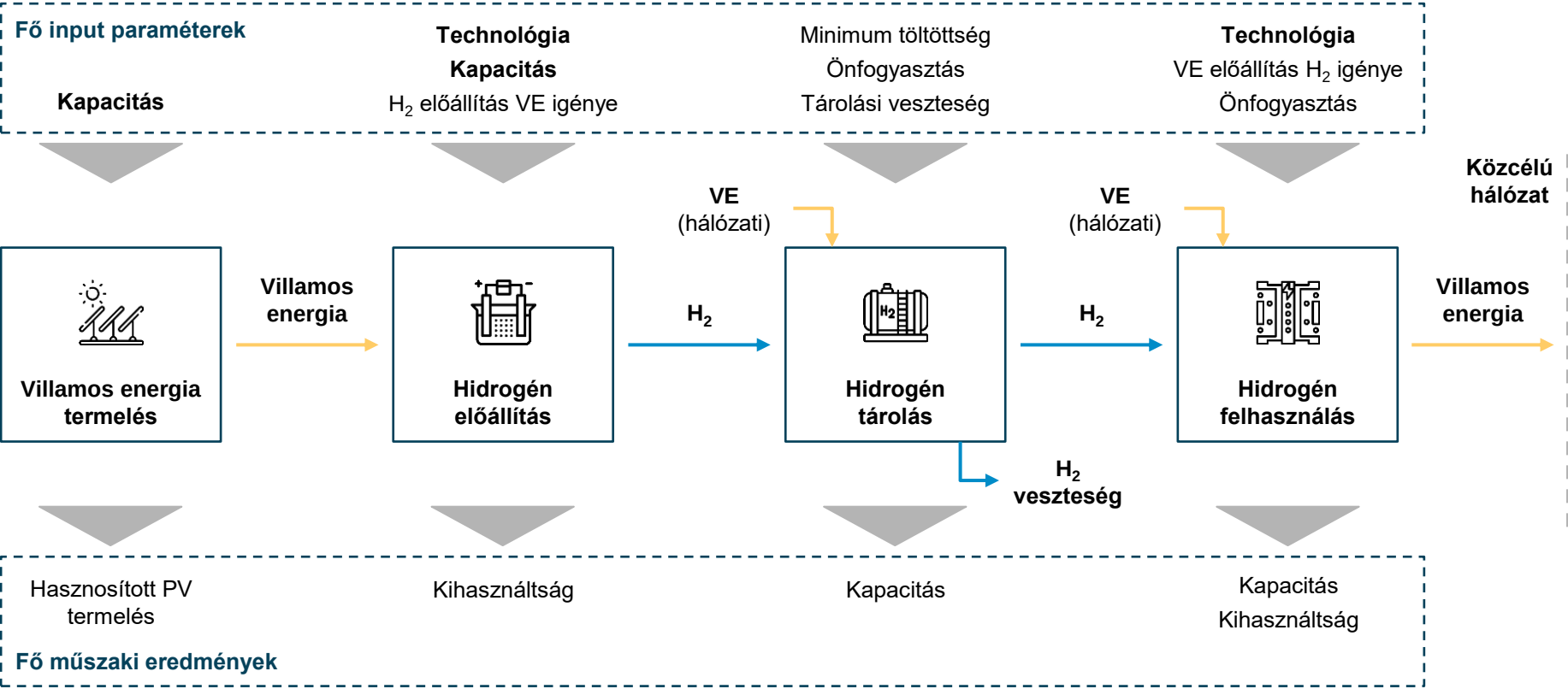
A modell követi a zöld hidrogén villamosenergia-rendszerbeli alkalmazásának értékláncát és számos technológiai opciót vizsgál



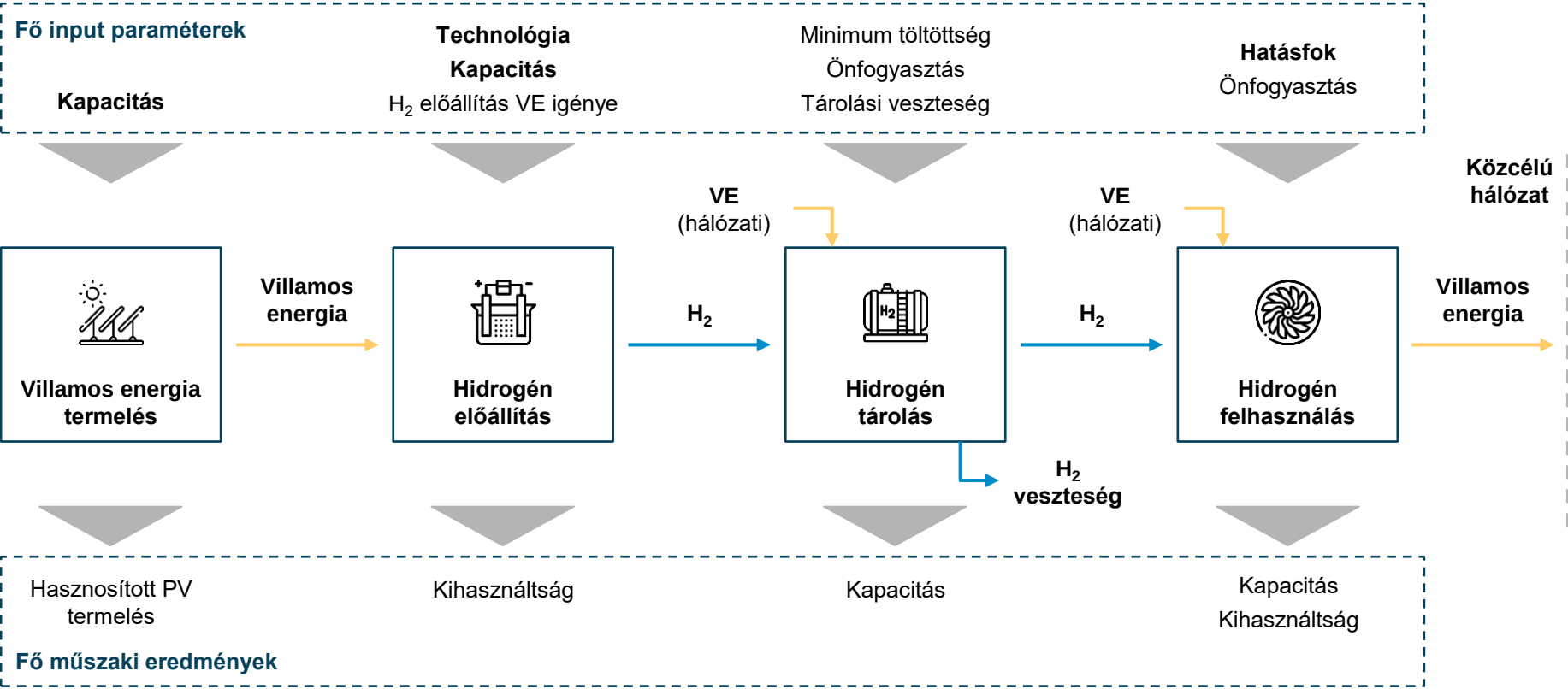
A modellezés fő eredményei a hidrogén villamosenergia-rendszerbeli alkalmazásának fő műszaki és pénzügyi kulcsmutatói



Modell értéklánca tüzelőanyag-cellás hasznosítás esetén



Modell értéklánca gázturbinás hasznosítás esetén



Modellezési forgatókönyvek



Három forgatókönyv mentén történik a hidrogén mint zöld villamos energia tároló eszköz modellezése

1.

Napon belüli alkalmazás

2.

Napok közötti alkalmazás

3.

Szezonális alkalmazás

Cél

Éjszakai zöld áram szolgáltatása

Zöld áram szolgáltatása a megújuló energiatermelés szempontjából kedvezőtlen időjárású napokon

Zöld áram szolgáltatása az év alacsony megújuló energiatermeléssel jellemezhető időszakban

Hidrogén előállítás

- **Egész évben**
- Napelemes energiatermelésnek megfelelően

- **Egész évben**
- Napelemes energiatermelésnek megfelelően

- **Április elejétől szeptember végéig,** nap folyamán folyamatosan
- Napelemes energiatermelésnek megfelelően

Hidrogén felhasználás

- **Éjszaka folyamán,** 19-24 óra között
- Aznap előállított H_2 egészét felhasználva, egyenletesen

- **Háromnapos időközönként,** egész nap
- Megelőző napokban előállított H_2 egészét felhasználva, egyenletesen

- **Október elejétől március végéig** folyamatosan, egész nap
- Termelési időszakban előállított H_2 egészét felhasználva, egyenletesen

Hidrogén tárolás

- Néhány órás tárolás
- **Nyomástartó tartály** alkalmazásával, sűrített gáz formájában

- Néhány napos tárolás
- **Nyomástartó tartály** alkalmazásával, sűrített gáz formájában

- Több hónapos tárolás
- **Geológiai tárolás,** kimerült szénhidrogén mezőben

Hidrogén előállítása és felhasználása az egyes forgatókönyvek esetén

H₂ előállítása és felhasználása

Napon belüli alkalmazás



- Az adott napon megtermelt H₂ még aznap teljes mértékben felhasználása is kerül.
- A **hidrogén előállításához használt villamosenergia-termelés** minden nap, a napelemes energiatermelésnek megfelelően zajlik.
- A **hidrogén termelés** minden nap, a naperőművi villamosenergia-termeléshez igazodva zajlik.
- A **hidrogén alapú villamos energia előállítása** minden éjszaka, 19-24 óra között, egyenletes mennyiségben történik.

Napok közötti alkalmazás



- A H₂ felhasználása adott napokon történik, ekkor az előtte napokon megtermelt mennyiség teljes mértékben felhasználásra kerül.
- A **hidrogén előállításához használt villamosenergia-termelés** minden nap, a napelemes energiatermelésnek megfelelően zajlik.
- A **hidrogén termelés** minden nap, a naperőművi villamosenergia-termeléshez igazodva zajlik.
- A **hidrogén alapú villamos energia előállítása** néhány naponta, egy teljes napon keresztül, egyenletes mennyiségben történik.

Szezonális alkalmazás



- A H₂ termelése április elejétől szeptember végéig, a felhasználása október elejétől március végéig zajlik.
- A **hidrogén előállításához használt villamosenergia-termelés** április elejétől szeptember végéig minden nap, a napelemes energiatermelésnek megfelelően zajlik.
- A **hidrogén előállítása** a termelési időszakban, a naperőművi villamosenergia-termeléshez igazodva zajlik.
- A **hidrogén alapú VE előállítása** a felhasználási időszakban minden nap, folyamatosan, egyenletes mennyiségben történik.

Hidrogén tárolása az egyes forgatókönyvek esetén

H₂ tárolása

Napon belüli alkalmazás



- Az adott napon megtermelt H₂ még aznap teljes mértékben felhasználása is kerül, így a tároló minden nap feltöltődik és kiürül.
- A **betárolás** minden nap, a naperőművi villamos energia termeléshez és hidrogén előállításához igazodva történik.
- A **kitárolás** minden éjszaka, 19-24 óra között, egyenletes mennyiségben történik.
- A **tároló méretét** a maximális napi H₂ termelés határozza meg, a minimális nyomás követelményt figyelembe véve.

Napok közötti alkalmazás



- A H₂ felhasználása adott napokon történik, ekkor az előtte napokon megtermelt mennyiség teljes mértékben felhasználásra kerül.
- A **betárolás** minden nap, a naperőművi villamos energia termeléshez és hidrogén előállításához igazodva történik.
- A **kitárolás** néhány naponta, egy teljes napon keresztül, egyenletes mennyiségben történik.
- A **tároló méretét** a maximális felhasználási mennyiség határozza meg, a minimális nyomás követelményt figyelembe véve. Az egyidejű be- és kitárolás megvalósításához moduláris kialakítás szükséges.

Szezonális alkalmazás



- A H₂ termelése április elejétől szeptember végéig, a felhasználása október elejétől március végéig zajlik.
- A **betárolás** a termelési időszakban minden nap, a villamos energia termeléshez és hidrogén előállításához igazodva történik.
- A **kitárolás** a felhasználási időszakban minden nap, folyamatosan, egyenletes mennyiségben történik.
- A **tároló méretét** a termelési időszakban megtermelt teljes mennyiség határozza meg, a minimális nyomás követelményt figyelembe véve.

Műszaki premissák



Konverziós tényezők

Műszaki premisszák



Konverziók

Hidrogén				
Mennyiség	Mértékegység		Mennyiség	Mértékegység
Átváltás tömeg és térfogat között				
1	kg	=	11,1	m ³ (normál)
Átváltás tömeg és energia (elektromos) között				
1	kg	=	33,3	kWh (LHV)
1	kg	=	39,4	kWh (HHV)
Átváltás tömeg és energia (hő) között				
1	kg	=	120	MJ (LHV)
1	kg	=	142	MJ (HHV)

Műszaki premisszák



Műszaki premisszák

PV			
Premissza	Érték	ME	Leírás
Vezérelhető inputok			
Kapacitás AC	20 (kezdeti)	MW	A PV naperőmű AC oldali kapacitása.
Felülírható premisszák			
Inverter hatékonyság	20%	%	A DC és AC oldal közötti átalakítás vesztesége.
Degradáció	0,56%	%	A naperőmű teljesítményének éves csökkenése.
Számított paraméterek			
Kapacitás DC	24 (kezdeti)	MW	A PV naperőmű DC oldali kapacitása.
Hasznosított PV termelés	Forgatókönyv szerint	%	Az éves hasznosított termelés és összes termelt energia aránya.

Elektrolizáló – PEM

Műszaki premisszák



Műszaki premisszák

Elektrolizáló – PEM			
Premissza	Érték	ME	Leírás
Vezérelhető inputok			
Kapacitás	10 (kezdeti)	MW	Az elektrolizáló kapacitása.
Felülírható premisszák			
Energiaigény	55	kWh / kg H ₂	A H ₂ előállításához szükséges villamos energia mennyisége.
Minimális teljesítmény	5%	%	A működéshez szükséges minimális teljesítmény, a kapacitáshoz képest.
Degradáció	1%	%	Az elektrolizáló teljesítményének éves csökkenése.
Számított paraméterek			
Kihasználtság	Forgatókönyv szerint	%	Az éves felvett és maximálisan felvehető villamos energia aránya

Elektrolizáló – Alkáli

Műszaki premisszák



Műszaki premisszák

Elektrolizáló – Alkáli			
Premissza	Érték	ME	Leírás
Vezérelhető inputok			
Kapacitás	10 (kezdeti)	MW	Az elektrolizáló kapacitása.
Felülírható premisszák			
Energiaigény	50	kWh / kg H ₂	A H ₂ előállításához szükséges villamos energia mennyisége.
Minimális teljesítmény	0%	%	A működéshez szükséges minimális teljesítmény, a kapacitáshoz képest.
Degradáció	2%	%	Az elektrolizáló teljesítményének éves csökkenése.
Számított paraméterek			
Kihasználtság	Forgatókönyv szerint	%	Az éves felvett és maximálisan felvehető villamos energia aránya

Tároló – Nyomástartó tartály (sűrített gáz)

Műszaki premisszák



Műszaki premisszák

Tároló – Nyomástartó tartály			
Premissza	Érték	ME	Leírás
Vezérelhető inputok			
Nincsenek vezérelhető inputok.			
Felülírható premisszák			
Minimum tárolási igény	10%	%	A tároló megfelelő működéséhez szükséges minimális töltöttségi szint.
Energetikai hatékonyság	95%	H ₂ LHV %-a	A tárolás teljes energiaigénye, betárolt mennyiség alapján.
Veszteség	0%	%	A tárolás során jelentkező H ₂ veszteség.
Számított paraméterek			
Tárolási kapacitás	Forgatókönyv szerint	%	A szükséges tároló kapacitás mértéke a termelt H ₂ teljeskörű eltárolásához.

Tároló – Kimerült szénhidrogén mező

Műszaki premisszák

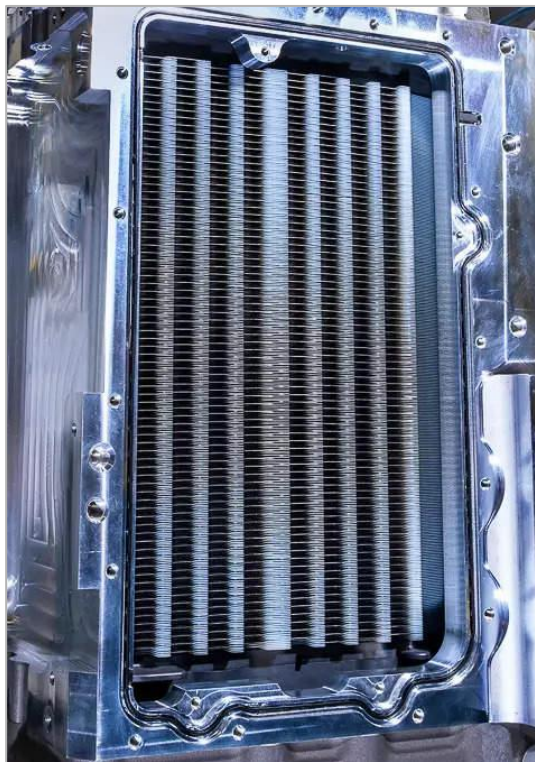


Műszaki premisszák

Tároló – Kimerült szénhidrogén mező			
Premissza	Érték	ME	Leírás
Vezérelhető inputok			
Nincsenek vezérelhető inputok.			
Felülírható premisszák			
Minimum tárolási igény	20%	%	A tároló megfelelő működéséhez szükséges minimális töltöttségi szint.
Energetikai hatékonyság	80%	H ₂ LHV %-a	A tárolás teljes energiaigénye, betárolt mennyiség alapján.
Veszteség	2%	%	A tárolás során jelentkező H ₂ veszteség.
Számított paraméterek			
Tárolási kapacitás	Forgatókönyv szerint	%	A szükséges tároló kapacitás mértéke a termelt H ₂ teljeskörű eltárolásához.

Tüzelőanyag-cella – PEM TC

Műszaki premisszák



Műszaki premisszák

Tüzelőanyag-cella – PEM			
Premissza	Érték	ME	Leírás
Vezérelhető inputok			
Nincsenek vezérelhető inputok.			
Felülírható premisszák			
Hidrogén igény	0,06	kg H ₂ / kWh	A villamos energia előállításához szükséges H ₂ mennyisége.
Villamos energia igény	0,1	kWh / kg H ₂	A tüzelőanyag-cella önfogyasztásának mértéke.
Degradáció	1%	%	A tüzelőanyag-cella teljesítményének éves csökkenése.
Számított paraméterek			
Kapacitás	Forgatókönyv szerint	MW	A tüzelőanyag-cella kapacitása.
Kihasználtság	Forgatókönyv szerint	%	Az éves termelt és maximálisan előállítható villamos energia aránya.

Tüzelőanyag-cella – Szilárd-oxidos TC

Műszaki premisszák



Műszaki premisszák

Tüzelőanyag-cella – Szilárd-oxidos (SO)			
Premissza	Érték	ME	Leírás
Vezérelhető inputok			
Nincsenek vezérelhető inputok.			
Felülírható premisszák			
Hidrogén igény	0,05	kg H ₂ / kWh	A villamos energia előállításához szükséges H ₂ mennyisége.
Villamos energia igény	0,6	kWh / kg H ₂	A tüzelőanyag-cella önfogyasztásának mértéke.
Degradáció	2%	%	A tüzelőanyag-cella teljesítményének éves csökkenése.
Számított paraméterek			
Kapacitás	Forgatókönyv szerint	MW	A tüzelőanyag-cella kapacitása.
Kihasználtság	Forgatókönyv szerint	%	Az éves termelt és maximálisan előállítható villamos energia aránya.

Tüzelőanyag-cella – Olvadék-karbonátos TC

Műszaki premisszák



Műszaki premisszák

Tüzelőanyag-cella – Olvadék-karbonátos (MC)			
Premissza	Érték	ME	Leírás
Vezérelhető inputok			
Nincsenek vezérelhető inputok.			
Felülírható premisszák			
Hidrogén igény	0,05	kg H ₂ / kWh	A villamos energia előállításához szükséges H ₂ mennyisége.
Villamos energia igény	0,7	kWh / kg H ₂	A tüzelőanyag-cella önfogyasztásának mértéke.
Degradáció	3%	%	A tüzelőanyag-cella teljesítményének éves csökkenése.
Számított paraméterek			
Kapacitás	Forgatókönyv szerint	MW	A tüzelőanyag-cella kapacitása.
Kihasználtság	Forgatókönyv szerint	%	Az éves termelt és maximálisan előállítható villamos energia aránya.

Gázturbina – 100% H₂ üzemű GT

Műszaki premisszák



Műszaki premisszák

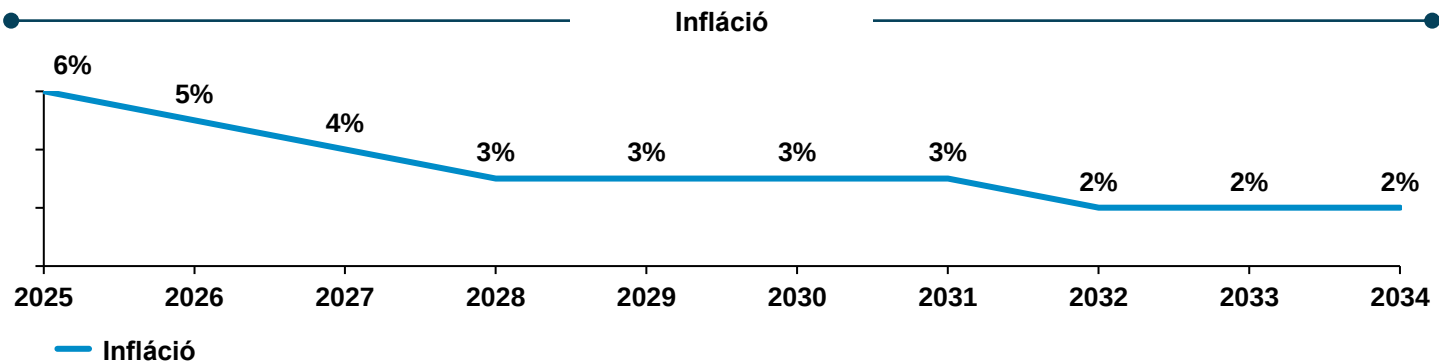
Elektrolizáló – PEM			
Premissza	Érték	ME	Leírás
Vezérelhető inputok			
Hatásfok	45% (kezdeti)	%	A gázturbina hatásfoka, az input és az output energia aránya.
Felülírható premisszák			
Villamos energia igény	0,03	kWh / kg H ₂	A gázturbina önfogyasztásának mértéke.
Számított paraméterek			
Kapacitás	Forgatókönyv szerint	MW	A gázturbina kapacitása.
Kihasználság	Forgatókönyv szerint	%	Az éves termelt és maximálisan előállítható villamos energia aránya.

Pénzügyi premisszák

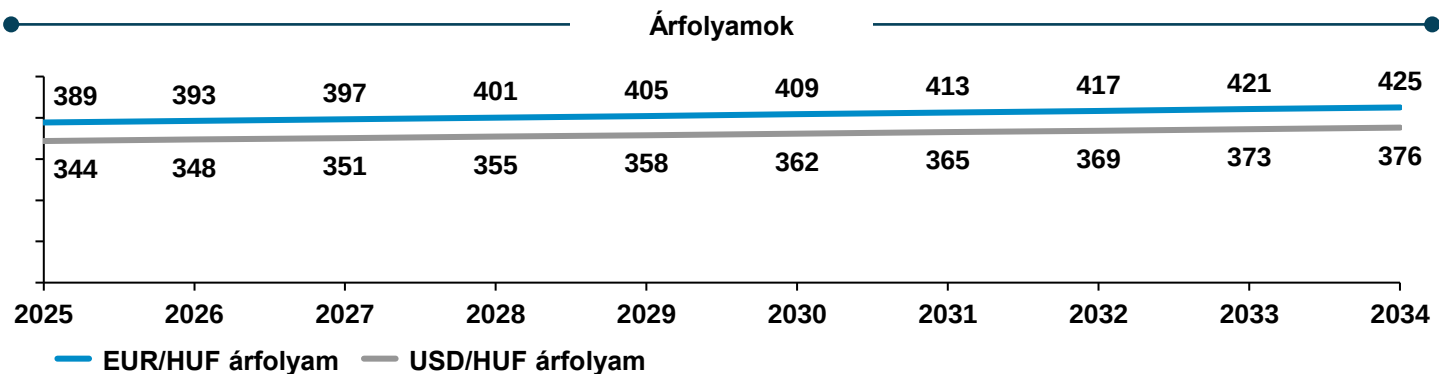


Infláció és árfolyamok

Pénzügyi premisszák



- Az elkövetkező években magasabb inflációs környezet várható
- Közép távon az infláció mérséklődik



- A modell euró alapú, a premisszákat és az eredmények számítását euróban végzi.
- Az árfolyamok szerepeltetése a modell továbbfejlesztését támogatja.

Különböző szakirodalmi források és tanulmányok jelentősen eltérő fajlagos CAPEX értékekről adnak számot

Szakirodalomban fellelhető fajlagos CAPEX értékek

Forrás		International Energy Agency	Hazai árajánlatok alapján benchmark	Clean Hydrogen Partnership	U.S. Department of Energy
Megjelenés éve		2023	2022	2022	2020
PV erőmű	EUR / MW	-	1 000 000	-	-
Elektrolizáló – PEM	EUR / MW	1 800 000	1 200 000	900 000	1 300 000
Elektrolizáló – Alkáli	EUR / MW	1 500 000	-	600 000	-
Nyomástartó edény	EUR / kg H ₂	-	550	750	-
Kimerült szénhidrogén mező	EUR / kg H ₂	-	-	10	-
TC – PEM	EUR / MW	-	2 500 000	1 900 000	1 200 000
TC – Szolid-oxidos	EUR / MW	-	-	10 000 000	-
TC – Olvadék-karbonátos	EUR / MW	-	-	-	-
100% H2 üzemű gázturbina	EUR / MW	-	-	-	-

CAPEX és OPEX

Pénzügyi premisszák

Pénzügyi premisszák

CAPEX és OPEX				
Technológia	CAPEX		OPEX (CX%)	CAPEX alapja
PV erőmű	1 000 000	EUR / MW	1,75%	Hazai benchmark
Elektrolizáló – PEM	1 800 000	EUR / MW	2%	IEA 2023
Elektrolizáló – Alkáli	1 500 000	EUR / MW	4%	IEA 2023
Nyomástartó edény	550	EUR / kg H ₂	2,5%	Hazai benchmark
Kimerült szénhidrogén mező	10	EUR / kg H ₂	2,5%	Clean Hydrogen Partnership, 2022
TC – PEM	2 500 000	EUR / MW	2%	Hazai benchmark
TC – Szolid-oxidos	3 500 000	EUR / MW	2%	Szakirodalom alapján PEM TC-nél magasabb becsült érték
TC – Olvadék-karbonátos	4 000 000	EUR / MW	2%	Szakirodalom alapján PEM TC-nél magasabb becsült érték
100% H ₂ üzemű gázturbina	1 100 000	EUR / MW	2%	Gyártók elérhető adatlapjai

